

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift  
10 DE 196 20 906 A 1

21 Aktenzeichen: 196 20 906.4  
22 Anmeldetag: 24. 5. 98  
23 Offenlegungstag: 8. 1. 98

51 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
H 02 P 9/48  
H 02 J 3/38  
H 02 J 3/38  
H 02 M 7/44  
F 03 D 7/00

DE 196 20 906 A 1

71 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:  
Karlecik-Maier, Franz, Dipl.-Ing., 91315 Höchstadt,  
DE

56 Entgegenhaltungen:

DE 44 20 600 A1  
DE 42 32 356 A1

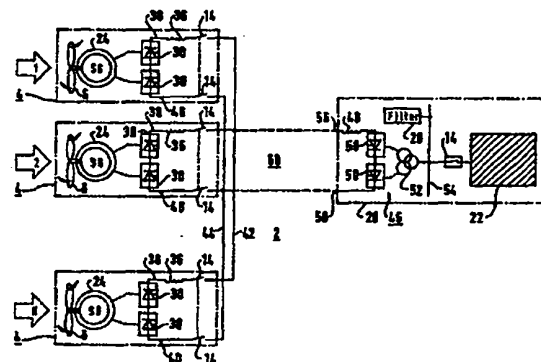
SCHMIDT, ZSCHARUT: Bedingungen für den Anschluß von Windenergieanlagen an ein regionales Elektroenergie-Versorgungsnetz. In: Elektr. 1995, S.249-253;  
KÄMMERER, NIEMAND: Anschluß von Windkraftanlagen an das öffentliche Stromversorgungsnetz. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg.89, 1990, H.24, S.1384-1394;

FIB, WEIDEMANN, WECK, WEINEL:  
Netzrückwirkungen und Netzanbindung von Windenergieanlagen. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg.91, 1992, H.22, S.1424-1434;  
OEDING: Prinzipien und Grenzen der elektrischen Energieübertragung. In ETZ-A, Bd.91, 1970, H.1 S.29-36;  
THEDA: HGÜ,  
Hochspannungsgleichstromübertragung heute. In: de/der elektromeister und deutsches Elektrohandwerk, 6/82, S.332-335;  
KANNGIEßER, OBERMAN: Energieübertragung über weite Entfernungen. In: ETZ Bd.102, 1981, H.25, S.1332-1337;  
Elektrische Energietechnik, 29.Jg., 1984, Nr.1, S.59-60;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Windenergiepark

57 Die Erfindung bezieht sich auf einen Windenergiepark (2). Erfindungsgemäß weist dieser Windenergiepark (2) wenigstens zwei Windenergieanlagen (4) und eine netzseitige Stromrichterstation (46) auf, wobei jede Windenergieanlage (4) einen Rotor (6), einen Generator (24), einen Gleichrichter (30), eine Glättungsdrossel (36) und eine Einrichtung (62) zur Leistungsregelung aufweist, wobei die netzseitige Stromrichterstation (46) eine Glättungsdrossel (48), einen Wechselrichter (50), einen Anpaßtransformator (52), einen Filter (28) und eine Regelanordnung (102) aufweist, wobei die Windenergieanlagen (4) gleichstromseitig elektrisch parallelgeschaltet und wobei die netzseitige Stromrichterstation (46) gleichstromseitig mit den gleichstromseitig parallelgeschalteten Windenergieanlagen (4) elektrisch in Reihe geschaltet ist. Somit erhält man einen Windenergiepark (2), dessen gesamte zur Verfügung stehende Windenergieleistung in ein regionales Versorgungsnetz übertragen werden kann.



DE 196 20 906 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 11.97 702 062/20

15/26

Die Erfindung bezieht sich auf einen Windenergiepark.

Die Einspeisung der mit dem stochastischen Primär-energeträger Wind erzeugten Elektroenergie in ein regionales Versorgungsnetz ist nicht unproblematisch. Aus dem Aufsatz "Bedingungen für den Anschluß von Windenergieanlagen an ein regionales Elektroenergie-Versorgungsnetz", abgedruckt in der DE-Zeitschrift "ELEKTRIE", Berlin 49 (1995) 5/6/7, Seiten 249 bis 253 ergeben sich die technischen Anforderungen für Windenergieparks. Die in diesem Aufsatz aufgestellten Anforderungen an die Windenergieanlagen beziehen sich auf Leistungs- oder Spannungsänderungen, Leistungsschwankungen, Netzflicker und machen Angaben zu den Netzkurzschlußkriterien eines Windenergieparks.

Die Spannungsanhebung an der Windenergiepark-Einspeisestelle in das regionale Versorgungsnetz darf, entsprechend einer Normvorschrift, nicht mehr als 4% betragen. Aus dieser Forderung ergibt sich eine maximal mögliche Energieleistung in Abhängigkeit von der Entfernung zum einspeisenden Umspannwerk des regionalen Versorgungsnetzes. Für das in diesem Aufsatz dargestellte Windenergieanlagenkonzept wird die Energie der einzelnen in einem Windenergiepark gehörenden Windenergieanlagen über eine Drehstromleitung oder ein Drehstromkabel bis zum Umspannwerk des regionalen Netzes übertragen. Dadurch kann es zu der bereits genannten Limitierung der Anschlußleistung des Windenergieparks kommen, obwohl die gesamte zur Verfügung stehende Windenergieleistung des Windenergieparks größer ist.

Die Windenergieanlagen-Leistungsschwankungen sind gemäß Richtlinien für das Mittelspannungsnetz auf maximal 2% und für das Niederspannungsnetz auf maximal 3% begrenzt. Eine derartige Forderung kann nur von Windenergieanlagen erfüllt werden, die eine Leistungsregelung haben, wobei diese Leistungsregelung jedoch sehr langsam ist, weil sie mit einer sogenannten "Pitch-Regelung" realisiert wird, die über die Rotorblattverstellung wirkt.

Ein weiterer Störfaktor sind die Oberschwingungen, die vor allem im Einspeisestrom der netzseitigen Wechselrichter vorkommen. Diese sind mit geeigneten Filtern zu kompensieren. Bei langen Kabelleitungen kann es im Mittelspannungsnetz zu Resonanzen zwischen der Kabelkapazität und der Kurzschlußreaktanz der Anlage kommen. Bei Asynchrongeneratoren können keine Oberschwingungen auftreten.

Ein weiterer Störfaktor ist das Flicker-Problem. Durch Leistungsschwankungen entstehen Schwankungen in der Versorgungsspannung. Diese Spannungsschwankungen verursachen unter anderem Helligkeitsschwankungen in Glühlampen und Leuchtstofflampen, die auch "Flicker" genannt werden. Da das menschliche Auge sehr empfindlich auf diese "Flicker" reagiert, müssen der Höhe und Häufigkeit der Spannungsschwankungen enge Grenzen gesetzt werden. Dieses Flicker-Problem kann nur dann reduziert werden, wenn zwischen dem Aggregat, bestehend aus Rotor und Generator, und einem Mittelspannungs-Netz ein Zwischenkreis kombiniert mit einer Leistungsregelung vorhanden ist. Wie bereits festgestellt, ist die Windenergieanlagen-Leistungsregelung langsam. Da auch ein Parallelbetrieb der Windenergieanlagen bei einem Windenergiepark vorsieht, kann sehr schwer die Interferenz der Einzel-Flicker im Mittelspannungsnetz vorausgesagt bzw. un-

terdrückt werden.

Die Fig. 1 zeigt ein bekanntes Konzept eines Windenergieparks 2 mit N Windenergieanlagen 4. Jede Windenergieanlage 4 weist einen Rotor 6, ein Getriebe 8, einen Asynchrongenerator 10 und einen Anpaßtransformator 12 auf. Jede Windenergieanlage 4 ist mittels eines Leistungsschalters 14 mit einer Sammelschiene 16 elektrisch leitend verbunden, die mittels einer Drehstromleitung 18 mit einem Umspannwerk 20 eines regionalen Versorgungsnetzes 22, beispielsweise eines Mittelspannungsnetzes, verknüpft ist. Auch diese Drehstromleitung 18 ist über Leistungsschalter 14 freischaltbar. Dieses Konzept ist zwar preisgünstig, jedoch technisch nicht sehr zuverlässig, da beispielsweise zusätzlich ein Getriebe 8 verwendet wird. Der Vorteil des Asynchrongenerators 10 ist, daß er keine Oberschwingungen produziert. Jedoch spielt bei dem Asynchrongenerator 10 die Spannungsänderung eine große Rolle. Dabei kann es passieren, daß Windenergieanlagen 4 mit einer geringeren als geplanten Leistungen ans Netz gehen dürfen oder daß die einzuspeisende Leistung begrenzt werden muß.

Die Fig. 2 zeigt ebenfalls ein bekanntes Konzept eines Windenergieparks 2 mit N Windenergieanlagen 4. Jede Windenergieanlage 4 weist einen Rotor 6, einen Synchrongenerator 24, einen Umrichter 26, einen Anpaßtransformator 12 und einen Filter 28 auf. Jede Windenergieanlage 4 ist wie beim Windenergieparkkonzept gemäß Fig. 1 mittels Leistungsschalter 14 mit einer Sammelschiene 16 verbunden, die über eine Drehstromleitung 18 mit einem Umspannwerk 20 eines regionalen Versorgungsnetzes 22 verknüpft ist. Der Umrichter 26 weist eingangsseitig einen mehrpulsigen, beispielsweise 12-pulsigen, Gleichrichter 30 und ausgangssseitig einen mehrpulsigen, beispielsweise 12-pulsigen, Puls-Wechselrichter 32 auf, wobei der Gleichrichter 30 und der Puls-Wechselrichter 32 mittels eines Gleichspannungs-Zwischenkreises 34 verbunden ist.

Gegenüber der Windenergieanlage 4 gemäß der Fig. 1 ist bei dieser Windenergieanlage 4 der Rotor 6 direkt mit dem Synchrongenerator 24 verbunden und die Rotorblätter dieses Rotors 6 sind verstellbar. Diese Verstellbarkeit der Rotorblätter des Rotors 6 ist durch Pfeile gekennzeichnet. Der Synchrongenerator 24 weist zwei um 30° elektrisch zueinander versetzte Ständerwicklungen auf, die jeweils mit einem Teilgleichrichter des Gleichrichters 30 verknüpft sind.

Um die Oberschwingungsströme des Puls-Wechselrichters 32 zu kompensieren, sind entsprechende Filter 28 vorgesehen. Da bei diesen Windenergieanlagen 4 zwischen dem Aggregat, bestehend aus Rotor 6 und Synchrongenerator 24, und dem regionalen Versorgungsnetz 22 ein Gleichspannungs-Zwischenkreis 34 und eine langsame Leistungsregelung durch die verstellbaren Rotorblätter vorhanden ist, kann das Flicker-Problem reduziert werden. Jedoch kann die Interferenz der Einzel-Flicker im regionalen Versorgungsnetz nur sehr schwer vorausgesagt bzw. unterdrückt werden.

Diese bekannten Konzepte für Windenergieparks 2 sind alle dezentrale Drehstrom-Konzepte, weil die Energie der einzelnen Windenergieanlagen 4 in das regionale Versorgungsnetz 22 eingespeist wird. Da die Spannungsanhebung an der Windenergiepark-Einspeisestelle in das regionale Versorgungsnetz 22 nicht mehr als 4% betragen darf, ergibt sich eine maximal mögliche Windenergieleistung in Abhängigkeit von der Entfernung der Windenergiepark-Einspeisestelle vom Umspannwerk 20. D.h., ein Großteil der mit den Windener-

gieanlagen 4 erzeugten Leistung kann nicht in ein regionales Versorgungsnetz 22 eingespeist werden.

Der Erfindung liegt nunmehr die Aufgabe zugrunde, einen Windenergiepark mit mehreren Windenergieanlagen anzugeben, bei dem die bestehenden Nachteile der bekannten Konzepte für Windenergieparks nicht mehr auftreten.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

Dadurch, daß die Windenergieanlagen eines Windenergieparks gleichstromseitig elektrisch parallel geschaltet sind, werden nicht mehr gemäß der Anzahl der Windenergieanlagen mehrere Wechselrichter benötigt, sondern nur noch eine netzseitige Stromrichterstation, die einen Wechselrichter aufweist. Dieser Wechselrichter der netzseitigen Stromrichterstation ist gleichstromseitig mit dem gleichstromseitig parallel geschalteten Windenergieanlagen elektrisch in Reihe geschaltet. Dadurch erhält man ein Gleichstromkonzept für einen Windenergiepark.

Dieses vorgeschlagene Gleichstrom-Konzept basiert auf der Erkenntnis, daß alle Anforderungen an Windenergieparks bezüglich Leistungs- oder Spannungsänderungen, Leistungsschwankungen, Netz-Flicker und Netz-Kurzschluß-Kriterien von der am Windenergiepark-Anschlußort vorhandene Netzkurzschlußleistung abhängen. Je höher die Netzkurzschlußleistung am Anschlußort ist, um so leichter werden die Anforderungen von Windenergiepark erfüllt.

Weil die Gleichstrom-Übertragung den Windenergiepark elektrisch bis zum Wechselrichter der netzseitigen Stromrichterstation bringt, ist ein Gleichstrom-Konzept dem bekannten Drehstrom-Konzepten technisch überlegen, da die netzseitige Stromrichterstation näher oder direkt am Umspannwerk des regionalen Versorgungsnetzes, d. h. am Anschlußort mit der höheren oder höchsten Netzkurzschlußleistung, installiert werden kann.

Bei dem erfindungsgemäßen Gleichstrom-Konzept des Windenergieparks wird die Energie über eine Gleichstrom-Leitung bis zum Wechselrichter der netzseitigen Stromrichterstation übertragen, dessen Standort wiederum so bestimmt werden kann, daß die gesamte zur Verfügung stehende Windenergieleistung in ein regionales Versorgungsnetz übertragen werden kann und sich gleichzeitig ein preisliches Optimum ergibt. Außerdem weist jede Windenergieanlage eine Leistungsregelung auf, die schnell ist, weil sie über den Steuerwinkel des Gleichrichters wirkt. Durch die Verschaltung der Windenergieanlagen im Gleichstrom-Zwischenkreis wird die Interferenz der Einzel-Flicker im Gleichstromkreis und nicht im regionalen Versorgungsnetz stattfinden. Weil der Wechselrichter der netzseitigen Stromrichterstation eine zentrale Energieübergabestelle zum regionalen Versorgungsnetz darstellt und eine Drehstromspannungsregelung besitzt, wird der Flicker praktisch ausgeglichen. Außerdem kann das erfindungsgemäße Gleichstrom-Konzept eines Windenergieparks bei einer niedrigeren Kurzschlußleistung am Einspeisort als die vergleichbaren Drehstrom-Konzepte betrieben werden.

Außerdem wird durch das erfindungsgemäße Konzept für einen Windenergiepark die zentrale Drehstrom-Spannungsregelung des Windenergieparks mit den schnellen dezentralen Windenergieanlagen-Leistungsregelungen kombiniert, wodurch den Energieversorgungsunternehmen eine erhebliche Verbesserung der Qualität der Energieeinspeisung aus Windenergieparks geboten wird.

Bei einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Windenergieparks ist zwischen dem gleichstromseitig parallel geschalteten Windenergieanlagen und der netzseitigen Stromrichterstation eine Gleichstrom-Übertragungseinrichtung geschaltet. Durch diese Gleichstrom-Übertragungseinrichtung kann die netzseitige Stromrichterstation direkt an einem Umspannwerk eines regionalen Versorgungsnetzes errichtet werden, so daß die gesamte zur Verfügung stehende Windenergieleistung in das regionale Versorgungsnetz eingespeist werden kann. So erhöht sich der Wirkungsgrad eines Windenergieparks wesentlich.

Bei einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Windenergieparks weist jede Windenergieanlage einen Rotor mit verstellbaren Rotorblättern und eine Drehzahlregelung auf. Mittels dieser Drehzahlregelung wird erreicht, daß das Aggregat Rotor-Generator an der obersten erlaubten Leistungsgrenze (Maximalspannung) arbeitet, womit der Leistungs-Regelbereich jeder Windenergieanlage optimal ausgenutzt werden kann. Die Drehzahlregelung wirkt über die Rotorblattverstellung, wobei ein Drehzahl-Sollwert aus der Windgeschwindigkeit generiert wird.

Vorteilhafte Ausgestaltungen des Windenergieparks sind den Unteransprüchen 4 bis 15 zu entnehmen.

Zur weiteren Erläuterung der Erfindung wird auf die Zeichnung Bezug genommen, in der eine vorteilhafte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Windenergieparks schematisch veranschaulicht ist.

Fig. 1 zeigt ein erstes bekanntes Konzept eines Windenergieparks,

Fig. 2 zeigt ein zweites bekanntes Konzept eines Windenergieparks, in

Fig. 3 ist eine vorteilhafte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Konzeptes eines Windenergieparks dargestellt, in

Fig. 4 wird die maximale Windenergieleistung in Abhängigkeit von der Windenergiepark-Entfernung zum Umspannwerk eines regionalen Versorgungsnetzes dargestellt, die

Fig. 5 zeigt ein Blockschaltbild einer Einrichtung zur Leistungsregelung und eine Drehzahlregelung einer Windenergieanlage, wobei die

Fig. 6 ein Blockschaltbild einer Regelanordnung der netzseitigen Stromrichterstation veranschaulicht, die

Fig. 7 zeigt in einem Diagramm den Leistungs-Regelbereich einer Windenergieanlage und die

Fig. 8 zeigt in einem Diagramm den Windenergiepark-Multiterminalbetrieb.

Die Fig. 3 zeigt eine vorteilhafte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Konzeptes eines Windenergieparks 2. Dieser Windenergiepark 2 weist N Windenergieanlagen 4 auf. Jede Windenergieanlage 4 weist einen Rotor 6, dessen Rotorblätter verstellbar sind, einen Synchrongenerator 24, einen Gleichrichter 30 und eine Glättungsdrossel 36 auf. Der Synchrongenerator 24 ist direkt mit dem Rotor 6 gekoppelt und weist zwei 30° elektrisch zueinander versetzte Statorwicklungen auf, die jeweils mit einem Teilgleichrichter des Gleichrichters 30 elektrisch leitend verbunden sind. Der Rotor 6 des Synchrongenerators 24 kann eine Permanentterregung oder eine spannungsgeregelte Erregung aufweisen. Der Gleichrichter 30 ist mehrpulsig, beispielsweise 12-pulsig, ausgeführt. Die Glättungsdrossel 36 ist beispielsweise in der positiven Ausgangsleitung 38 angeordnet. Diese positive Ausgangsleitung 38 und eine negative Ausgangsleitung 40 sind jeweils mittels Leistungsschalter 14 von einer positiven und negativen

Stromschiene 42 und 44 trennbar. Mittels dieser beiden Stromschienen 42 und 44 sind die N Windenergieanlagen 4 des Windenergieparks 2 gleichstromseitig parallel geschaltet.

Eine netzseitige Stromrichterstation 46 ist bei dieser Darstellung des Gleichstromkonzeptes des Windenergieparks 2 direkt bei dem Umspannwerk 20 eines regionalen Versorgungsnetzes 22 angeordnet. Diese netzseitige Stromrichterstation 46 weist eine Glättungsdrössel 48, einen Wechselrichter 50, einen Anpaßtransformator 52 und einen Filter 28 auf. Der Wechselrichter 50 besteht ebenso wie der Gleichrichter 30 einer jeden Windenergieanlage 4 aus zwei Teilwechselrichtern. Die Pulsigkeit des Wechselrichters 50 entspricht ebenfalls der Pulsigkeit der Gleichrichter 30. Jeder Teilwechselrichter ist mit einer Sekundärwicklung des Anpaßtransformators 52 elektrisch leitend verbunden, wobei dessen Primärwicklung mit einer Sammelschiene 54 des Umspannwerkes 20 verbunden ist. An dieser Sammelschiene 54 ist außerdem das Filter 28 angeschlossen. Die Glättungsdrössel 48 ist beispielsweise in der positiven Eingangsleitung 56 des Wechselrichters 50 angeordnet. Diese positive Eingangsleitung 56 und eine negative Eingangsleitung 58 sind mittels einer Gleichstrom-Übertragungseinrichtung 60 mit der positiven und negativen Stromschiene 42 und 44 der elektrisch parallel geschalteten Windenergieanlagen 4 elektrisch leitend verbunden. Die Gleichstrom-Übertragungseinrichtung 60, die zwei Gleichstromleitungen oder ein Gleichstromkabel sein kann, kann mittels nicht näher dargestellter Leistungsschalter 14 freigeschaltet werden. Bei dieser Konzeptdarstellung wurde auf die Veranschaulichung von Einrichtungen 62 zur Leistungsregelung der Windenergieanlagen 4 und einer Regelanordnung 102 der netzseitigen Stromrichterstation 46 aus Übersichtlichkeitsergründen verzichtet. Die zugehörigen Blockschaltbilder dieser Einrichtung 62 zur Leistungsregelung und dieser Regelanordnung 102 sind in den Fig. 5 und 6 dargestellt.

In der Darstellung der Fig. 4 wird das bekannte Konzept gemäß Fig. 2 und das erfindungsgemäße Konzept gemäß Fig. 3 eines Windenergieparks 2 hinsichtlich der maximalen Windenergieleistung verglichen. Wie bereits eingangs erwähnt, hängt die im regionalen Versorgungsnetz 22 einzuspeisende Energie von der Entfernung zwischen den Windenergieanlagen 4 und der Einspeisestelle ab. Im oberen Teil dieser Darstellung ist das bekannte Drehstromkonzept veranschaulicht. Dieser Darstellung ist zu entnehmen, daß die einzuspeisende Energie ungefähr 1,5 MW beträgt, wobei die Windenergieanlagen 4 des Windenergieparks 2 von der Einspeisestelle 8 km entfernt ist. Im unteren Teil dieser Darstellung ist das erfindungsgemäße Gleichstrom-Konzept veranschaulicht. Dabei sind zwei Varianten dieses Gleichstrom-Konzeptes dargestellt. Bei der ersten Variante ist die netzseitige Stromrichterstation 46 des Windenergieparks 2 mittig zwischen den Windenergieanlagen 4 und der Einspeisestelle angeordnet. Dabei ist die netzseitige Stromrichterstation 46 gleichstromseitig mittels einer Gleichstrom-Übertragungseinrichtung 60 mit den gleichstromseitigen parallel geschalteten Windenergieanlagen 4 und wechselstromseitig mittels einer Drehstromleitung 18 mit der Einspeisestelle verbunden. Bei der zweiten Variante ist die netzseitige Stromrichterstation 46 des Windenergieparks 2 direkt an die Einspeisestelle angeordnet. Die einzuspeisende Energie beträgt bei der ersten Variante ungefähr 2,86 MW und bei der zweiten Variante 6 MW. D.h., mit der zweiten Vari-

ante des Gleichstrom-Konzeptes eines Windenergieparks 2 kann annähernd die vierfache Leistung in ein regionales Versorgungsnetz 22 eingespeist werden als mit dem bekannten Drehstrom-Konzept eines Windenergieparks 2 gemäß Fig. 2. Somit steigt auch der Wirkungsgrad annähernd um den Faktor 4.

Die Fig. 5 zeigt das Ersatzschaltbild mit einer Windenergieanlage 4 des Windenergieparks 2 nach Fig. 3 mit seiner zugehörigen Einrichtung 62 zur Leistungsregelung und einer Drehzahlregelanordnung 64. Diese Einrichtung 62 zur Leistungsregelung weist einen Sollwertgeber 66 mit einem vorgeschalteten Leistungssollwertgeber 68 und einer nachgeschalteten Vektorregelanordnung 70, dem eine Steuereinrichtung 72 nachgeschaltet ist, auf. Der Sollwertgeber 66 erhält als Eingangssignal einen Leistungs-Sollwert  $P_{o\ r}$  des vorgeschalteten Leistungssollwertgebers 68 und einen Gleichspannungs-Istwert  $U_{d\ r}$ . Aus diesen Werten  $P_{o\ r}$  und  $U_{d\ r}$  wird mittels des Sollwertgebers 66 ein Sollwertepaar  $I_{o\ r}$  und  $U_{o\ r}$  für Strom und Spannung des Gleichrichters 30 der Windenergieanlage 4 ermittelt. Der Sollwertgeber 66 weist zwei Kennlinienggeber 74 und 76 auf. Die für den Spannungs-Sollwert  $U_{o\ r}$  gewählte Kurve des ersten Kennlinienggebers 74 zeigt die VDVOC-Charakteristik (Voltage-Dependent -Voltage-Order-Characteristic), wobei am oberen Ende für den Bereich des stationären Betriebes als charakteristisches Merkmal ein bogenförmiger Verlauf vorgesehen ist. Der untere Bereich der Kennlinie ist spannungsbegrenzend ausgebildet. Die Kennlinie des zweiten Kennlinienggebers 76 für den Strom-Sollwert  $I_{o\ r}$  weist im wesentlichen eine VDCOL-Charakteristik (Voltage-Dependent-Current-Order-Limitation), d.h. spannungsabhängige Strombegrenzung, auf. Die Vektorregelanordnung 70 weist zwei Vergleicher 78 und 80, einen Addierer 82 und ein Regelglied 84 auf. Das gebildete Sollwertepaar  $U_{o\ r}$ ,  $I_{o\ r}$  wird dieser Vektorregelanordnung 70 zugeführt und dort mit einem ermittelten Istwertepaar  $U_{d\ r}$ ,  $I_{d\ r}$  mittels der beiden Vergleicher 78 und 80 verglichen. Die gebildeten Regelabweichungen für Strom und Spannung werden mittels des Addierers 82 aufsummiert. Dieses Summensignal wird dem Regelglied 84 zugeführt, an dessen Ausgang ein Steuersignal für die Steuereinrichtung 72 des Gleichrichters 30 der Windenergieanlage 4 ansteht.

Der Leistungssollwertgeber 68, der einen Leistungs-sollwert  $P_{o\ r}$  in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit  $V$  generiert, weist eingangsseitig einen Funktionsgeber 86 und einen Rampengeber 88 auf. Mittels des Funktionsgebers 86 wird aus der Windgeschwindigkeit  $V$  ein Leistungs-Sollwert  $P_{o\ r}$  generiert. Der Gradient der Leistungs-Sollwertänderung wird von einer Rampe des Rampengebers 88 bestimmt.

Die Drehzahlregelanordnung 64 weist eingangsseitig einen Funktionsgeber 90 mit nachgeschalteten Rampengebern 92 und eine Drehzahlregleinrichtung 94 auf. Diese Drehzahlregleinrichtung 94 besteht aus einem Vergleichler 96 und einem Drehzahlregler 98 mit nachgeschalteter Rotorblattregelung 100. Der Vergleichler 96 vergleicht einen ermittelten Rotordrehzahl-Istwert  $n$  mit einem generierten Rotordrehzahl-Sollwert  $n_{o\ r}$ . Dieser Drehzahl-Sollwert  $n_{o\ r}$  wird windgeschwindigkeitsabhängig vom Funktionsgeber 90 geliefert. Der Gradient der Drehzahl-Sollwertänderung wird von einer Rampe des Rampengebers 92 bestimmt. Am Ausgang des Drehzahlreglers 98 steht ein Soll-Signal für die Rotorblattregelung 100 an. Am Ausgang dieser Rotorblattregelung 100 steht ein Steuer-Signal für den Ver-

stellmechanismus der Rotorblätter an, wodurch die Rotorblätter derart verstellt werden, daß die mittels des Vergleichers 96 ermittelte Rotordrehzahl-Regelabweichung zu Null wird.

Die Fig. 6 zeigt das Ersatzschaltbild der netzseitigen Stromrichterstation 46 des Windenergieparks 2 gemäß Fig. 3 mit seiner zugehörigen Regelanordnung 102. Diese Regelanordnung 102 weist eine Einrichtung 104 zur Ermittlung eines Leistungs-Sollwertes  $P_{o_i}$ , eine Einrichtung 106 zur Ermittlung eines Löschwinkel-Zusatz-Sollwertes  $\gamma_{o\_add}$ , einen Sollwertgeber 108, eine Vektorregleranordnung 110 und eine Steuereinrichtung 72 auf. Diese Regelanordnung 102 ist analog zu dem der Einrichtung 62 zur Leistungsregelung einer Windenergieanlage 4 aufgebaut. Eine weitere Beschreibung dieser Regelanordnung 102 erübrigt sich daher. Unterschiede liegen in der Anzahl der dem Sollwertgeber 108 zugeführten Werte, den Kennlinien der beiden Kennliniengeber 112 und 114 und der Einrichtung 104 zur Ermittlung eines Leistungs-Sollwertes  $P_{o_i}$ . Aufgrund der Varianz der Eingangsgrößen (Spannungs-Istwert  $U_{d_i}$ , Leistungs-Istwert  $P_{d_i}$ , Leistungs-Sollwert  $P_{o_i}$ , Löschwinkel-Sollwert  $\gamma_{o_i}$ , Löschwinkel-Istwert  $\gamma_i$ , Steuerwinkel  $\beta$ ) muß die Kennlinie, insbesondere die VDVO-Charakteristik des Kennliniengebers 112 in seiner Höhe im Endbereich und in seiner Neigung vorgebar sein. Auch die VDCOL-Charakteristik des Kennliniengebers 114 ist einstellbar. Wesentlichen für den zweiten Sollwertgeber 108 ist, daß auch ein Löschwinkel-Sollwert  $\gamma_{o_i}$  vorgegeben ist, der einzuhalten ist. Das erzeugte Sollwertepaar  $U_{o_i}$ ,  $I_{o_i}$  wird mittels zweier Vergleicher 78 und 80 mit einem ermittelten Istwertepaar  $U_{d_i}$ ,  $I_{d_i}$  verglichen. Die gebildeten Regelabweichungen werden mittels des Addierers 82 voneinander subtrahiert, da der Spannungs-Sollwert  $U_{o_i}$  des Sollwertepaares  $U_{o_i}$ ,  $I_{o_i}$  am invertierenden Eingang des Vergleichers 78 ansteht. Das Differenzsignal wird dem nachgeschalteten Regelglied 84 zugeführt, an dessen Ausgang ein Winkelsignal für die Steuereinrichtung 72 der netzseitigen Stromrichterstation 46 ansteht. Mittels diesem Winkelsignal wird die Differenz der Regelabweichung für Strom und Spannung zu Null geregelt.

Die Einrichtung 104 zur Ermittlung eines Leistungs-Sollwertes  $P_{o_i}$  weist ein Verzögerungsglied 116 erster Ordnung mit einer oberen und einer unteren Grenze auf. Dieser Einrichtung 104 wird ein ermittelter Leistungs-Istwert  $P_{d_i}$  und ein oberer und unterer Leistungs-Grenzwert  $P_{go_i}$  und  $P_{gu_i}$  zugeführt. Am Ausgang dieser Einrichtung 104 steht ein Leistungs-Sollwert  $P_{o_i}$  an.

Diese Regelanordnung 102 weist eine Einrichtung 106 zur Ermittlung eines Löschwinkel-Zusatz-Sollwertes  $\gamma_{o\_add}$  auf. Diese Einrichtung 106 weist eingangsseitig einen Vergleich 118 und ausgangsseitig einen PI-Regler 120 auf. Mittels dieses Vergleichers 118 wird in Abhängigkeit eines Drehspannungs-Sollwertes  $U_{o\_ac}$  und eines ermittelten Drehspannungs-Istwertes  $U_{ac}$  eine Drehspannungs-Regelabweichung ermittelt, die dem nachgeschalteten PI-Regler 120 zugeführt wird. Am Ausgang dieses PI-Reglers 120 steht ein Löschwinkel-Zusatz-Sollwert  $\gamma_{o\_add}$  an. Damit der Löschwinkel  $\gamma_{o_i}$  über den Sollwertgeber 108 nur innerhalb eines vorbestimmten Bereiches verändert werden kann, ist der PI-Regler 120 mit einem unteren Grenzwert Null und einem oberen Grenzwert  $\max \gamma_{o\_add}$  versehen. Der Löschwinkel-Sollwert  $\gamma_{o_i}$  setzt sich aus einem minimalen Löschwinkel-Sollwert  $\gamma_{o\_min}$  und dem ermittelten Löschwinkel-Zusatz-Sollwert  $\gamma_{o\_add}$ , wobei ein Addie-

rer 122 vorgesehen ist.

Diese in der Fig. 5 beschriebene Einrichtung 62 zur Leistungsregelung einer Windenergieanlage 4 eines Windenergieparks 2 und der Fig. 6 der beschriebenen Regelanordnung 102 der netzseitigen Stromrichterstation 46 eines Windenergieparks 2 sind aus der älteren deutschen Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 195 44 777.8 und dem Titel "Verfahren und Vorrichtung zur Regelung von n Stromrichterstationen eines HGÜ-Mehrpunktnetzes" bekannt. In dieser älteren deutschen Patentanmeldung sind die Einrichtung 62 zur Leistungsregelung und die Regelanordnung 102 und ihre Wirkungsweise ausführlich beschrieben, so daß an dieser Stelle darauf verzichtet werden kann.

In der Fig. 7 ist in einem Diagramm Gleichspannung Ud-Gleichstrom Id der Leistungs-Regelbereich einer Windenergieanlage 4 eines Windenergieparks 2 gemäß Fig. 3 dargestellt. Das Aggregat, bestehend aus Rotor 6 und Generator 24, einer Windenergieanlage 4 hat eine windgeschwindigkeitsabhängige "obere" und "untere" Leistungsbegrenzung. Die obere Leistungsbegrenzung ist von der Maximalspannung bestimmt, die das Aggregat an der Generatorklemme zur Verfügung stellen kann. Die untere Leistungsbegrenzung ist vom Maximalstrom bestimmt.

Die windgeschwindigkeitsabhängigen oberen und unteren Leistungsbegrenzungen werden "gleichgerichtet" als Gleichstromgrößen im Ud/Id-Diagramm dargestellt. Sie bestimmen den Leistungs-Regelbereich der Windenergieanlage 4. Die Charakteristik des Leistungsreglers im Ud/Id-Diagramm ist ein Hyperbel, die für hohe Spannungen von der oberen Leistungsbegrenzung (Maximalspannung) und für niedrige Spannung von der unteren Leistungsbegrenzung (Maximalstrom) limitiert wird.

Die Leistungsregelung ist eine kombinierte Spannungs-/Strom-Regelung und wirkt über den Steuerwinkel des Gleichrichters. Die Kennliniengeber 74 und 76 des Sollwertgebers 66 der Einrichtung 62 zur Leistungsregelung sind so abgestimmt, daß das nachgeschaltete Regelglied 84 im normalen Arbeitsbereich der Leistungshyperbel und bei reduzierter Spannung der unteren Leistungsbegrenzung im Ud/Id-Diagramm folgt. Der Leistungs-Regelbereich der Windenergieanlage 4 kann optimal ausgenutzt werden, wenn das Aggregat — Rotor 6, Generator 24 — an der oberen erlaubten Leistungsbegrenzung (Maximalspannung) arbeitet. Die Maximalspannung wird mit der Drehzahlregelung 64 erreicht, die über die Rotorblattverstellung wirkt.

Die Regelanordnung 102 gemäß Fig. 6 ist für die netzseitige Stromrichterstation 46 des Windenergieparks 2 gemäß Fig. 3 eine Widerstandsregelung mit überlagert er Drehstrom-Spannungsregelung, die über den Steuerwinkel des Wechselrichters 50 wirkt. Die überlagerte Drehstrom-Spannungsregelung ändert den Löschwinkel-Sollwert  $\gamma_{o_i}$  so, daß die unterlagerte Widerstandsregelung den Arbeitspunkt auf der Leistungshyperbel ansteuert, für den auch die Drehstrom-Spannung geregelt wird. Die schnelle, über den Steuerwinkel wirkende Drehstrom-Spannungsregelung kann ergänzt werden mit einer langsamen Stufenschalterregelung, für den Anpaßtransformator 52, die eine grobe Drehstrom-Spannungsregelung vornimmt. Sie ist eine ideale Leerlaufgleichspannungs-Regelung. Dabei wird der Sollwert der Stufenschalterregelung über einen Zusatzwert so verändert, daß die über Steuerwinkel wirkende Regelung möglichst immer unbegrenzt und in der Mitte des Steuerbereiches  $\alpha_{max_i}$  und  $\alpha_{min_i}$  arbeiten kann.

Die Fig. 8 zeigt beispielhaft einen Windenergiepark-Multiterminalbetrieb. Der Widerstandsregler mit der überlagerten Drehstrom-Spannungsregelung bestimmt den Arbeitspunkt AW für den Wechselrichter 50 der netzseitigen Stromrichterstation 46, für den die zu übertragende Leistung  $P_{wr}$  und die Drehstrom-Spannung eingehalten werden. Die Arbeitspunkte AG1, AG2 und AG3 der Gleichrichter 30 der Windenergieanlagen 4 ergeben sich aus der Topologie des Gleichstrom-Systems (Kirchhoff'sche Gesetz, Maschengleichung und Energieerhaltungssatz) und dem Wirken der Windenergieanlagen-Leistungsregelung automatisch. Die Windenergieanlagen-Leistungsregler suchen die Arbeitspunkte AG1, AG2 und AG3 auf deren Leistungshyperbeln, die die obengenannten Gesetze einhalten.

Dieses erfindungsgemäße Gleichstromkonzept für einen Windenergiepark 2 reduziert nicht nur die Anzahl der Komponenten (anstelle von N Wechselrichtern nur noch ein Wechselrichter), es kann zu weiteren Einsparungen führen, wenn die Drehstromleitungen 18 zwischen Ausgang der netzseitigen Stromrichterstation 46 und einem Netzeinspeisepunkt durch eine Gleichstrom-Übertragungseinrichtung 60 ersetzt wird. Für eine derartige Leistungsübertragung wäre es ratsam, die Spannung der Generatoren 24 der Windenergieanlagen 4 von z.Zt. 690 V auf deren sonst aus der Energieerzeugung üblichen Spannungswerten von 6–10 kV zu erhöhen. Wenn die Erde als Rückleiter benutzt werden darf, wird nur eine Gleichstromleitung als Gleichstrom-Übertragungseinrichtung 60 benötigt, wodurch sich der Preisvorteil ausbaut.

Die zentrale Drehstrom-Spannungsregelung des Windenergieparks 2 kombiniert mit den schnellen dezentralen Windenergieanlagen-Leistungsregelungen bieten den Energieversorgungsunternehmen eine wesentliche Verbesserung der Qualität der Energieeinspeisung aus Windenergieparks 2.

#### Patentansprüche

1. Windenergiepark (2) mit wenigstens zwei Windenergieanlagen (4) und einer netzseitigen Stromrichterstation (46), wobei jede Windenergieanlage (4) einen Rotor (6), einen Generator (24), einen Gleichrichter (30), eine Glättungsdrossel (36) und eine Einrichtung (62) zur Leistungsregelung aufweist, wobei die netzseitige Stromrichterstation (46) eine Glättungsdrossel (48), einen Wechselrichter (50), einen Anpaßtransformator (52), einen Filter (28) und eine Regelanordnung (102) aufweist, wobei diese Windenergieanlagen (4) gleichstromseitig elektrisch parallel geschaltet sind und wobei die netzseitige Stromrichterstation (46) gleichstromseitig mit den gleichstromseitig parallel geschalteten Windenergieanlagen (4) elektrisch in Reihe geschaltet ist.
2. Windenergiepark (2) nach Anspruch 1, wobei zwischen den gleichstromseitig parallel geschalteten Windenergieanlagen (4) und der netzseitigen Stromrichterstation (46) eine Gleichstromübertragungseinrichtung (60) geschaltet ist.
3. Windenergiepark (2) nach Anspruch 1, wobei jede Windenergieanlage (4) einen Rotor (6) mit verstellbaren Rotorblättern und eine Drehzahlregelanordnung (64) aufweist.
4. Windenergiepark (2) nach Anspruch 1, wobei die Einrichtung (62) zur Leistungsregelung einer Windenergieanlage (4) einen Sollwertgeber (66) mit ei-

nem vorgeschalteten Leistungs-Sollwertgeber (68) und einer nachgeschalteten Vektorregelanordnung (70), der eine Steuereinrichtung (72) nachgeschaltet ist, aufweist, wobei dem Sollwertgeber (66) zusätzlich ein Spannungs-Istwert ( $U_d r$ ), der Vektorregelung (70) zusätzlich ein ermitteltes Istwertepaar ( $I_d r, U_d r$ ) für Strom und Spannung und dem Leistungs-Sollwertgeber (68) ein Windgeschwindigkeits-Istwert ( $V$ ) zugeführt sind und wobei am Ausgang der Steuereinrichtung (72) ein Steuersignal für den Gleichrichter (30) einer Windenergieanlage (4) zur Verfügung steht.

5. Windenergiepark (2) nach Anspruch 1, wobei die Regelanordnung (102) der netzseitigen Stromrichterstation (46) eine Einrichtung (104) zur Ermittlung eines Leistungs-Sollwertes ( $P_o i$ ), eine Einrichtung (106) zur Ermittlung eines Löschwinkel-Zusatz-Sollwertes ( $\gamma_o add$ ), einen Sollwertgeber (108), eine Vektorregelanordnung (110) und eine Steuereinrichtung (72) aufweist, wobei die der Einrichtung (104) zur Ermittlung eines Leistungs-Sollwertes ( $P_o i$ ) ein ermittelter Leistungs-Istwert ( $P_d i$ ) und ein oberer und unterer Leistungs-Grenzwert ( $P_{go i}, P_{gu i}$ ), dem Sollwertgeber (108) ein Leistungs-Soll- und -Istwert ( $P_o i, P_d i$ ), ein Löschwinkel-Soll- und -Istwert ( $\gamma_o, \gamma$ ), ein Spannungs-Istwert ( $U_d i$ ) und ein Steuersignal ( $\beta$ ), der Vektorregelanordnung (110) ein ermitteltes Istwertepaar ( $I_d i, U_d i$ ) für Strom und Spannung und der Einrichtung (106) zur Ermittlung eines Löschwinkel-Zusatz-Sollwertes ( $\gamma_o add$ ), ein Drehspannungs-Soll- und -Istwert ( $U_o ac, U_{ac}$ ) zugeführt sind und wobei am Ausgang der Steuereinrichtung (72) ein Steuersignal für den Wechselrichter (50) der netzseitigen Stromrichterstation (46) zur Verfügung steht.

6. Windenergiepark (2) nach Anspruch 4, wobei der Leistungs-Sollwertgeber (68) der Einrichtung (62) zur Leistungsregelung einer Windenergieanlage (4) einen Funktionsgeber (86) mit nachgeschaltetem Rampengeber (88) aufweist.

7. Windenergiepark (2) nach Anspruch 4 oder 5, wobei der Sollwertgeber (66, 108) zwei Kennliniengeber (74, 76; 112, 114) für das Sollwertepaar ( $U_o r, I_o r; U_o i, I_o i$ ) für Strom und Spannung aufweist.

8. Windenergiepark (2) nach Anspruch 4 oder 5, wobei die Vektorregelanordnung (70, 110) zwei Vergleicher (78, 80), ein Addierglied (82) und ein Regelglied (84) aufweist, wobei jeweils ein Ausgang eines Vergleichers (78, 80) mit dem Addierglied (82) verknüpft ist, dessen Ausgang mit dem Eingang des Regelgliedes (84) verbunden ist.

9. Windenergiepark (2) nach Anspruch 5, wobei die Einrichtung (104) zur Ermittlung eines Leistungs-Sollwertes ( $P_o i$ ) der Regelanordnung (102) des Wechselrichters (50) der netzseitigen Stromrichterstation (46) ein Verzögerungsglied (116) erster Ordnung mit einer oberen und unteren Grenze ( $P_{go i}, P_{gu i}$ ) aufweist.

10. Windenergiepark (2) nach Anspruch 5, wobei die Einrichtung (106) zur Ermittlung eines Löschwinkel-Zusatz-Sollwertes ( $\gamma_o add$ ) der Regelanordnung (102) des Wechselrichters (50) der netzseitigen Stromrichterstation (46) einen Vergleicher (118) mit nachgeschalteten PI-Regler (120) aufweist, wobei am nichtinvertierenden Eingang des Vergleichers (118) ein Drehspannungs-Sollwert ( $U_o ac$ ), an seinem invertierenden Eingang ein

Drehspannungs-Istwert ( $U_{ac}$ ) und am Ausgang des PI-Reglers (120) der Löschwinkel-Zusatz-Sollwert ( $y_o$  add) anstehen.

11. Windenergiepark (2) nach Anspruch 3, wobei die Drehzahlregelanordnung (64) eingangsseitig einen Funktionsgeber (90) mit nachgeschalteten Rampengeber (92) aufweist, dem eine Drehzahlregelungseinrichtung (94) bestehend aus einem Vergleich (96) und einem Drehzahlregler (98), mit nachgeschalteter Rotorblatt-Regelung (100) nachgeschaltet ist, wobei dem Vergleich (96) der Drehzahlregelungseinrichtung (94) ein Rotordrehzahl-Soll- und -Istwert ( $n_o, n$ ) zugeführt ist.
12. Windenergiepark (2) nach Anspruch 2, wobei als Gleichstrom-Übertragungseinrichtung (60) eine Gleichstromleitung vorgesehen ist.
13. Windenergiepark (2) nach Anspruch 3, wobei als Gleichstrom-Übertragungseinrichtung (60) im Gleichstromkabel vorgesehen ist.
14. Windenergiepark (2) nach Anspruch 1, wobei als Generator (24) eine Synchronmaschine vorgesehen ist.
15. Windenergiepark (2) nach Anspruch 1, wobei die Synchronmaschine zwei  $30^\circ$ el zueinander versetzte Ständerwicklungen aufweist.

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -



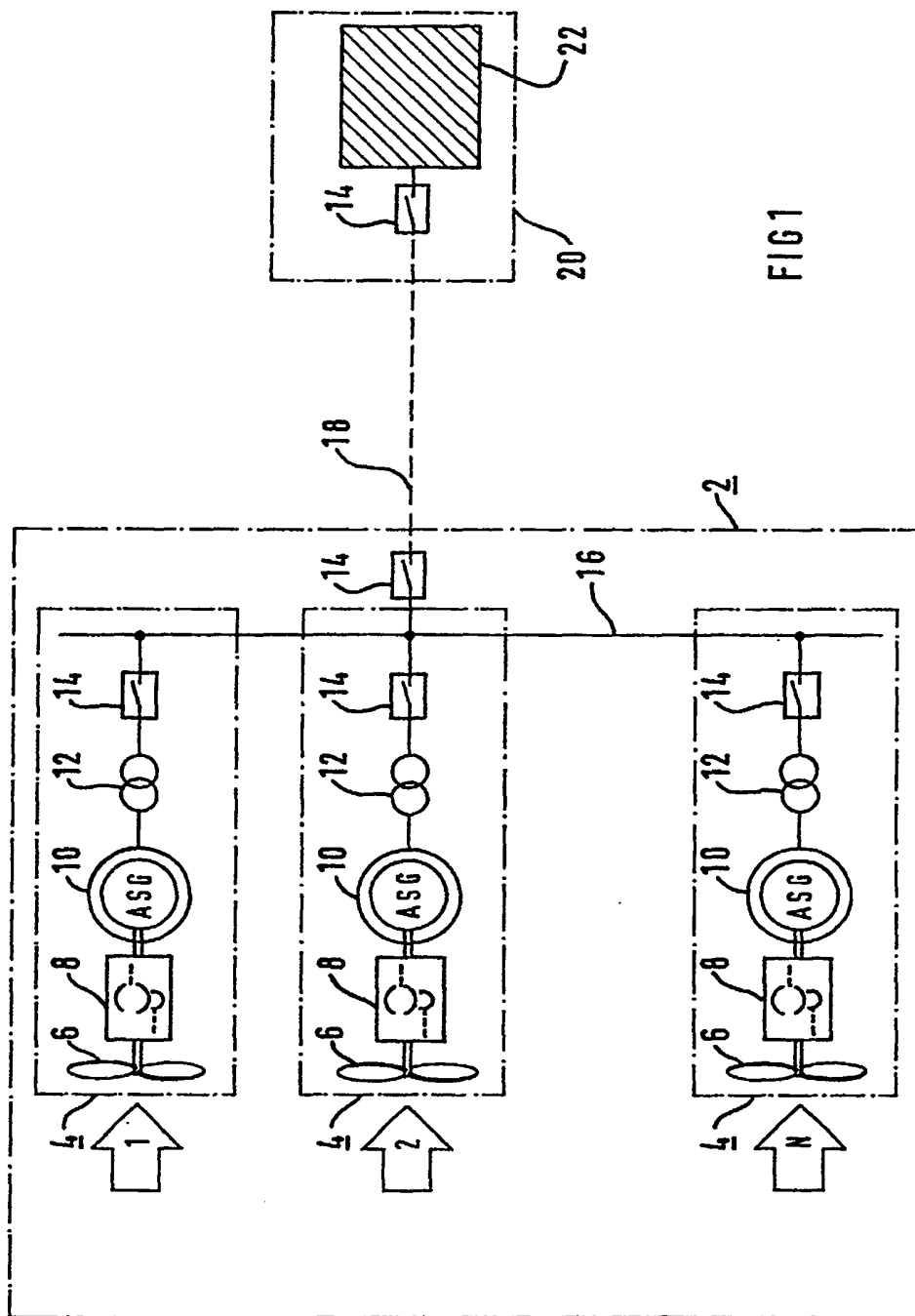
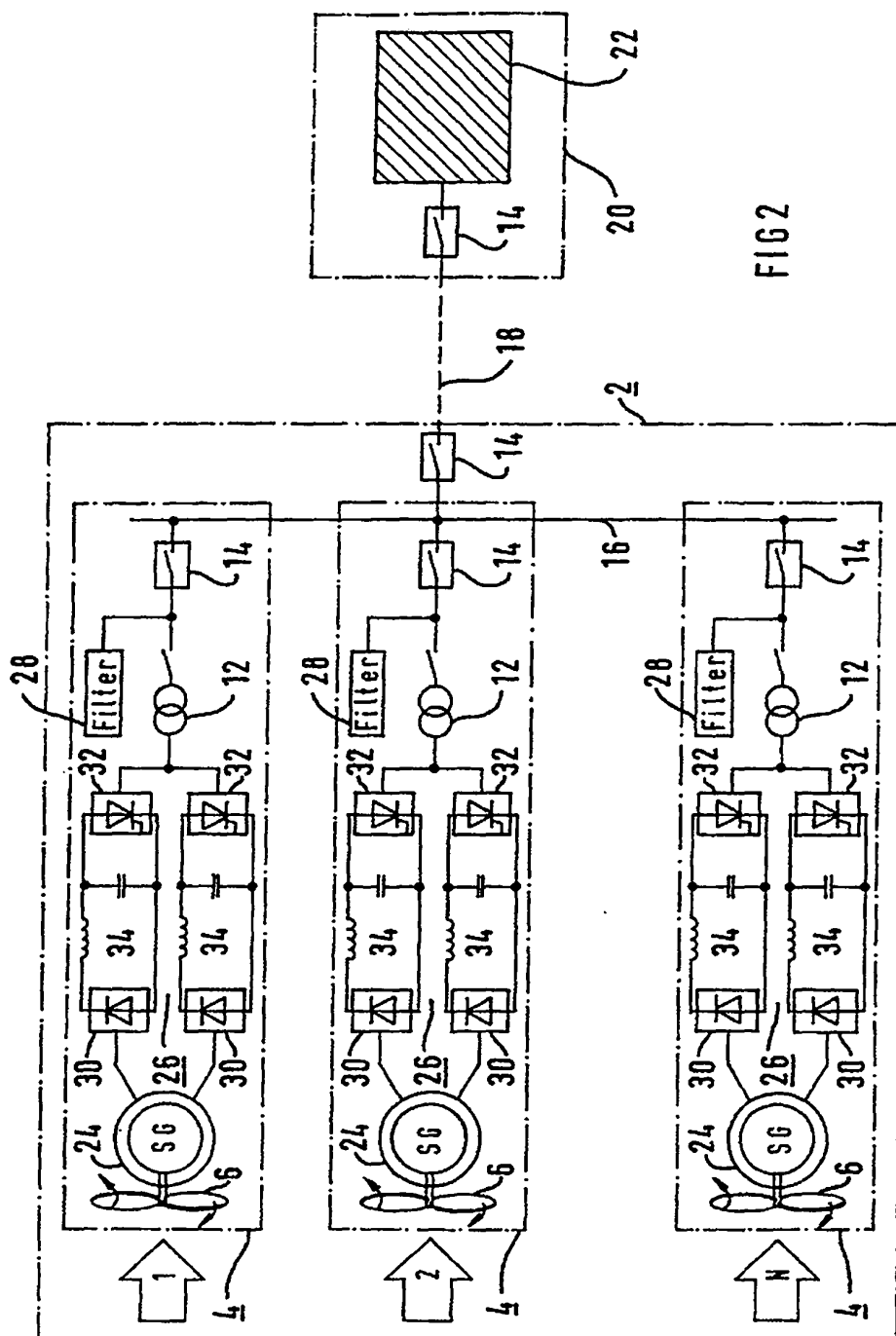
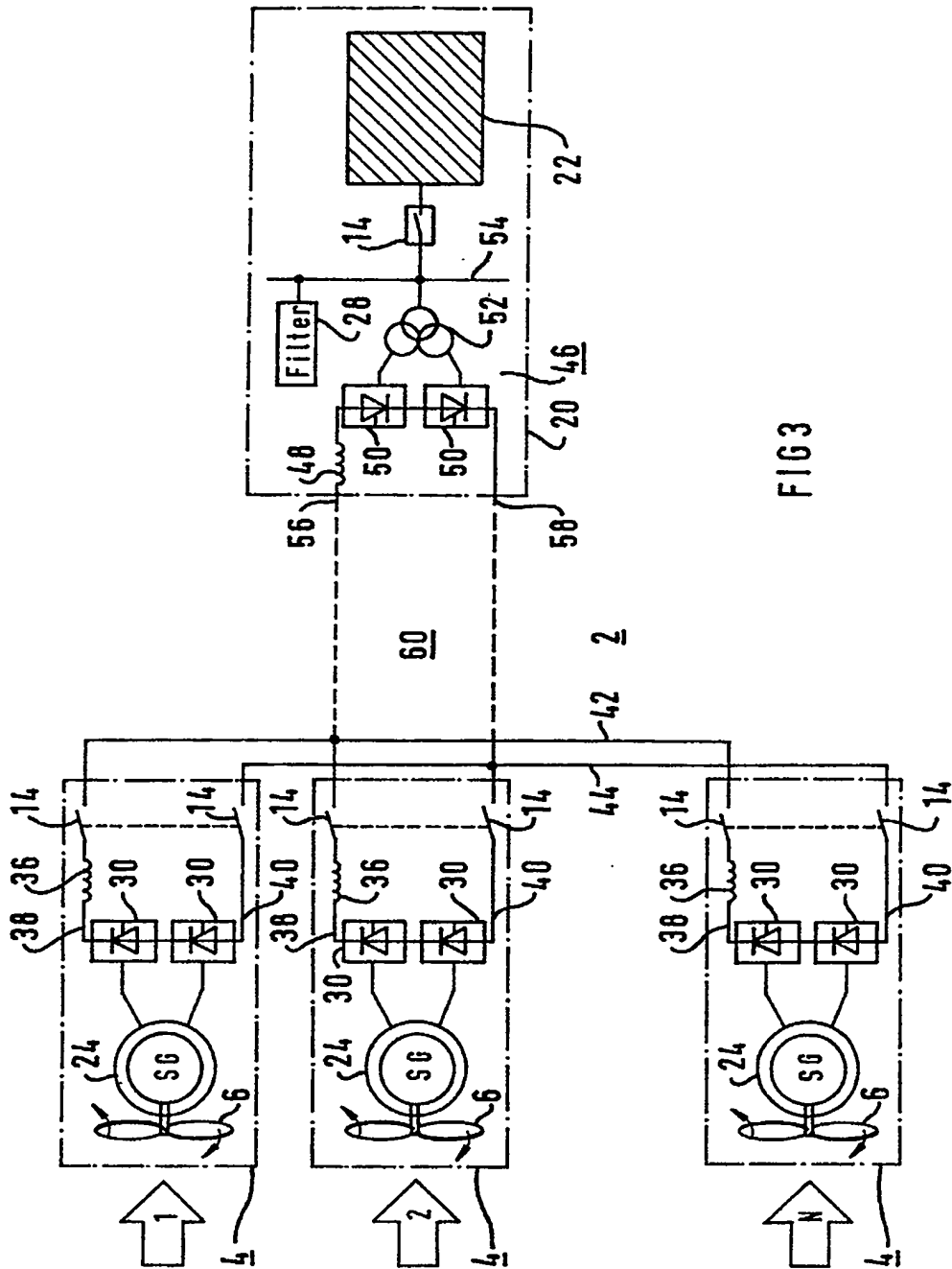


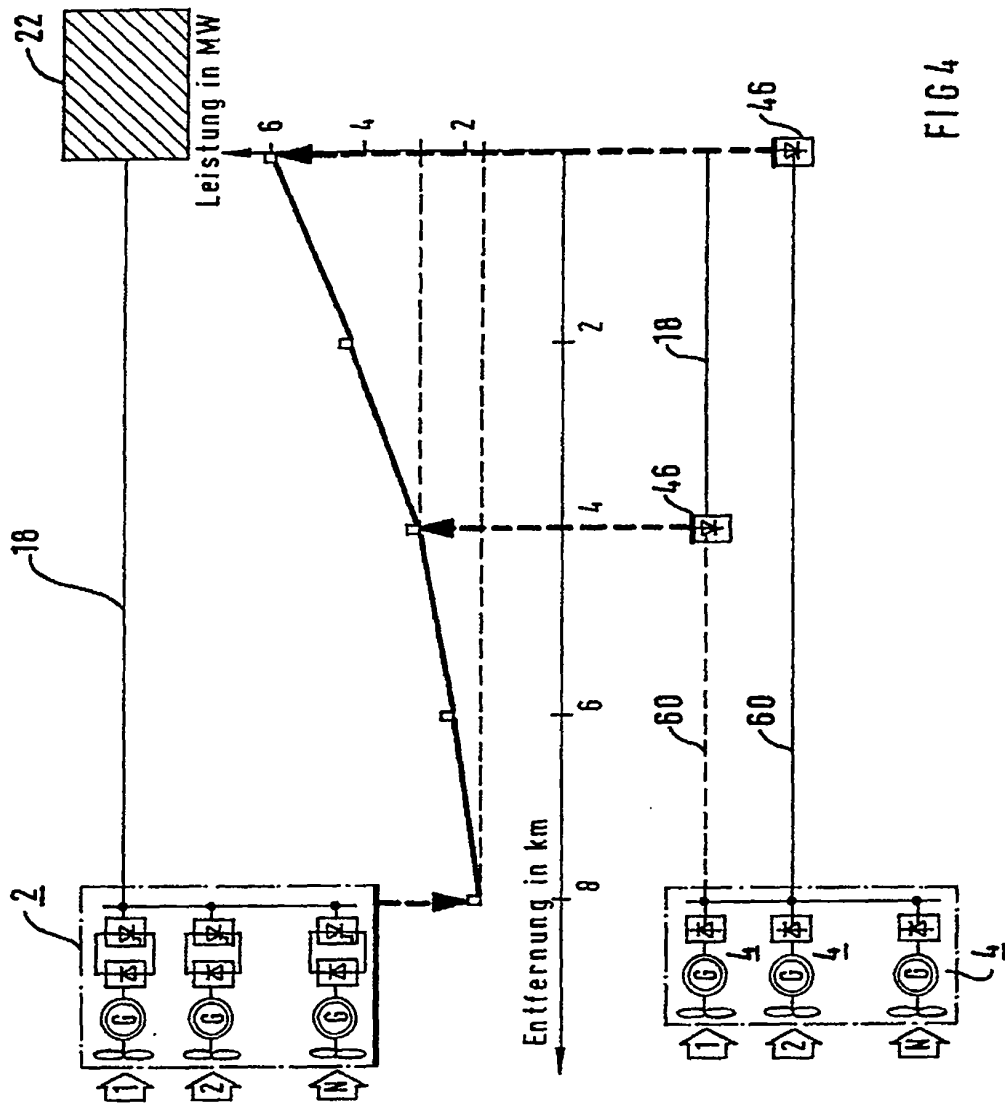
FIG 1

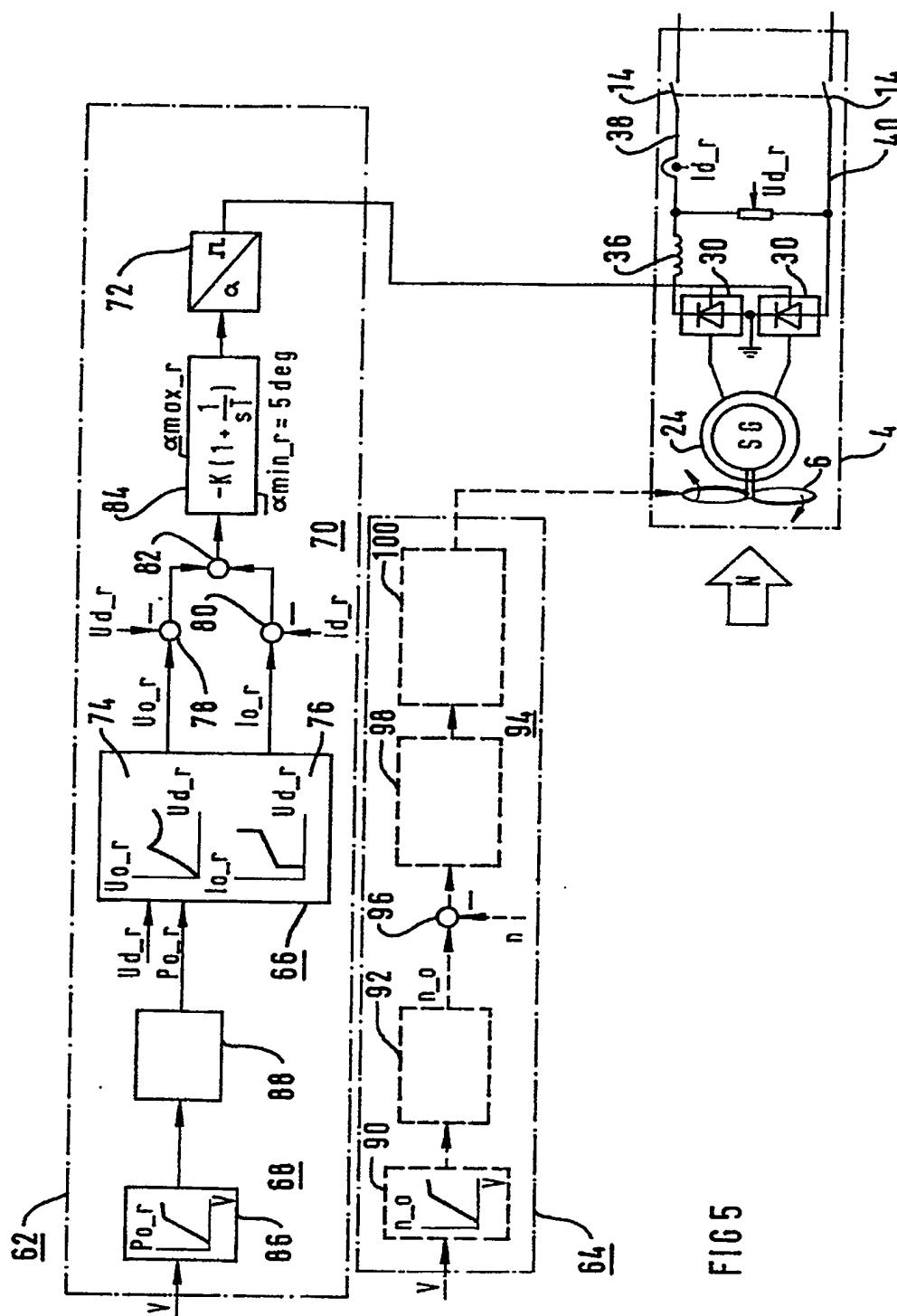


**FIG 2**

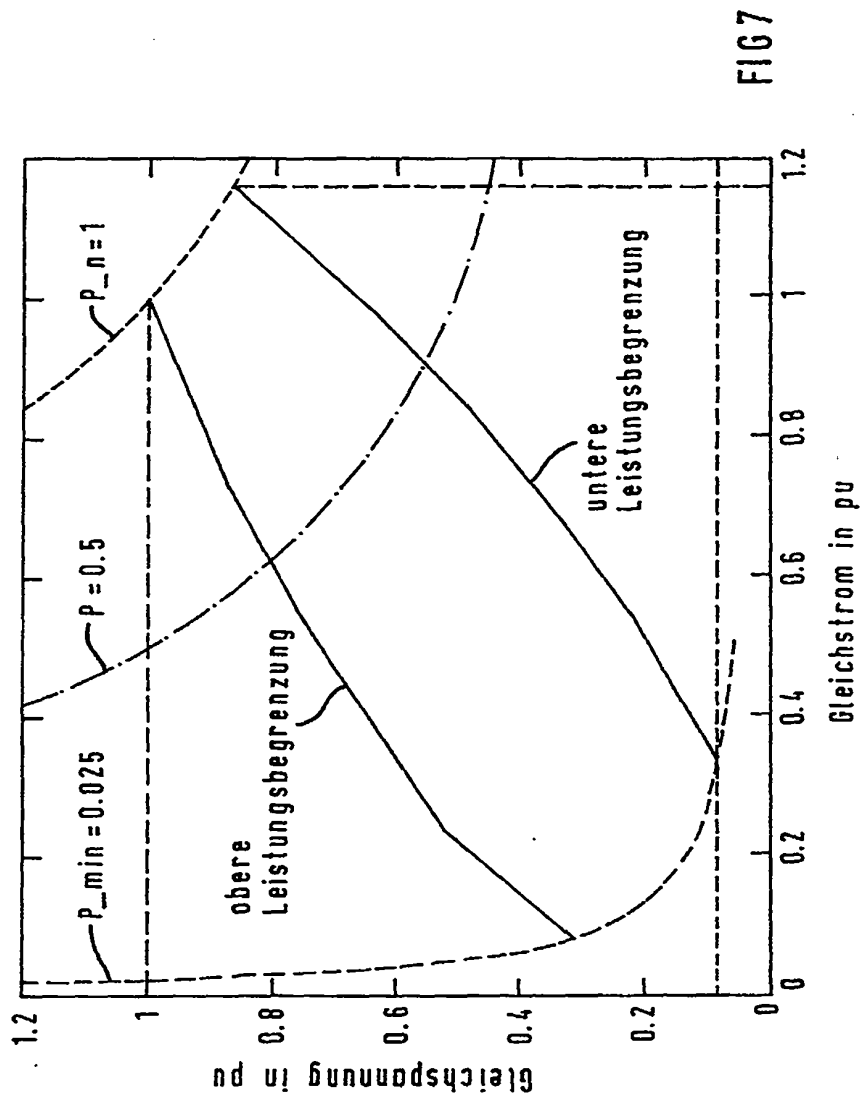


**FIG 3**









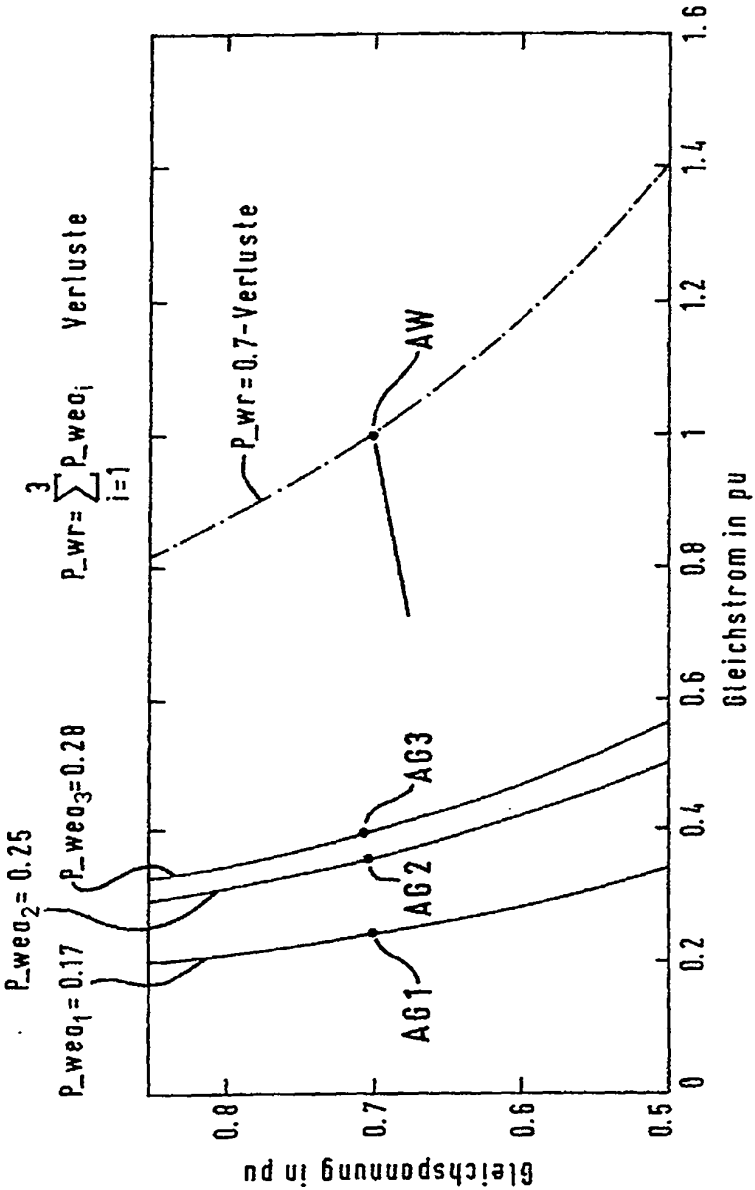


FIG 8